

Article, Published Version

**Putzar, Bert; Malcherek, Andreas**

## **Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101741>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Putzar, Bert; Malcherek, Andreas (2015): Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht. In: Die Küste 83. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 117-145.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht

*Bert Putzar und Andreas Malcherek*

## Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein morphodynamisch-numerisches Modell der Deutschen Bucht für Simulationen von einem Zeitraum von bis zu 100 Jahren beschrieben. Es kann den Einfluss von Tide, Wind und Seegang sowie Fernwellen berücksichtigen und Unterhaltungsmaßnahmen simulieren. Morphodynamische Beschleunigungsverfahren werden nicht verwendet. Die Validierung der Modellkomponenten hat eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung gezeigt. Insbesondere bei der Sedimentbilanz wurde jedoch deutlich, dass anthropogene Einflüsse, wie großräumige Baumaßnahmen, die Ergebnisse erheblich verfälschen können.

Mit dem Langfristmodell wurden verschiedene Szenarien zu natürlicher Sedimentdynamik gerechnet. Wesentliches Resultat ist, dass es sich bei der Deutschen Bucht um ein Depositionsgebiet handelt. Der Hauptanteil wird als Schwebstofffracht aus westlichen Richtungen eingetragen, während nach Norden nur ein geringer Teil das Gebiet verlässt. Der Vergleich zwischen einem windarmen und einem windreichen Szenario hat zudem gezeigt, dass sich die Sedimentfrachten durch stärkere Wind- und Seegangswirkung erhöhen. Bei alleiniger Tidebelastung führt ein Meeresspiegelanstieg zu einer Abnahme der positiven Sedimentbilanz.

Die Wirkung von anthropogenen Einflüssen wurde am Beispiel von Unterhaltungsmaßnahmen in der Außenelbe demonstriert. Man sieht, dass gerade bei mittel- bis langfristigen Prognosen der Morphodynamik Baggern und Verklappen berücksichtigt werden sollten. Andernfalls wird eine Sohllage prognostiziert, die erheblich von einer durch Menschen beeinflussten abweicht.

## Schlagwörter

Langfristmodellierung, Morphodynamik, Sedimenttransport, Deutsche Bucht, TELEMAC-2D, SISYPHE, TOMAWAC, DredgeSim

## Summary

*In this article a morphodynamic-numerical model for the German Bight is presented. It was developed to simulate long-term morphodynamic processes and can take into account the influence of tide, wind and waves separately. Additionally, dredging and dumping operations are simulated. The simulation model runs without any morphodynamic acceleration techniques. The validation of the model components shows a good agreement between measurements and simulation results. An important aspect concerns the sediment balance. It could be pointed out that anthropogenic impacts can have a significant influence on the validation results.*

*The long-term model was used to simulate natural sediment transport under the influence of different scenarios over a period of 100 years. The results indicate that the German Bight can be seen as a sedimentation area. The main amount is transported as suspended sediment and enters the domain from western directions. Only a small fraction leaves the German Bight through the northern boundary. The results of two scenarios indicate that strong wind impact increases sediment transport significantly. Furthermore, the influence of sea level rise was analyzed for tide driven simulations only. It can be shown that a rise in sea level decreases the positive sediment balance.*

*As an example of anthropogenic impacts, the influence of dredging operations in the Elbe River was described. The results show that dredging and dumping operations should be considered especially for medium and long-term morphodynamic predictions. Neglecting such anthropogenic impacts might lead to significant differences between simulated and real bed evolutions.*

## Keywords

*long-term modelling, morphodynamics, sediment transport, German Bight, TELEMAC-2D, SISYPHE, TOMAWAC, DredgeSim*

## Inhalt

1	Einleitung.....	119
1.1	Beschreibung der verwendeten numerischen Modelle .....	120
1.1.1	Hydrodynamikmodell.....	120
1.1.2	Seegangsmodell .....	120
1.1.3	Morphodynamikmodell .....	121
1.1.4	Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen .....	121
1.2	Modellkopplung .....	122
1.3	Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen .....	122
1.4	Modellierung von langfristigen Szenarien.....	124
2	Validierung des Langfristmodells.....	124
2.1	Hydrodynamik.....	125
2.2	Seegang.....	127
2.3	Sedimentdynamik.....	128
3	Szenarien zur ungestörten Sedimentdynamik .....	131
3.1	Szenario Meteorologie 2006 .....	131
3.1.1	Sohlentwicklung.....	131
3.1.2	Kumulierter Sedimenttransport.....	133
3.1.3	Residualer Sedimenttransport .....	133
3.2	Szenario Meteorologie 1996 .....	135
3.2.1	Sohlentwicklung.....	135
3.2.2	Residualer Sedimenttransport .....	137
3.2.3	Änderung der Volumenbilanzen .....	138
3.3	Szenario Meeresspiegelanstieg.....	139

3.3.1	Sohlentwicklung.....	139
3.3.2	Residualer Sedimenttransport.....	140
3.3.3	Langfristige Volumenbilanzen.....	140
4	Einfluss von Unterhaltungsmaßnahmen auf den Sedimenthaushalt.....	141
4.1	Sohlentwicklung im Mündungsbereich der Elbe.....	142
4.2	Längsprofil der Fahrrinne.....	142
4.3	Zeitreihen der Sohlentwicklung.....	143
5	Ausblick.....	144
6	Danksagung.....	144
7	Schriftenverzeichnis .....	144

## 1 Einleitung

Die Deutsche Bucht stellt ein Seegebiet mit einem komplexen Küstenraum dar, der stark anthropogen überprägt ist. Die Wirkung von periodischen Gezeiten, stochastischen Wind- und Seegangseignissen führt zu einem natürlichen Sedimenttransportprozess auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Sie können von Stunden und Metern bis hin zu Jahrhunderten und hunderten von Kilometern reichen. Zum anderen nimmt der Mensch die Deutsche Bucht massiv in Anspruch und greift teilweise gravierend in das System ein. Die Auswirkungen, z. B. auf den Sedimenthaushalt oder auf das sensible Ökosystem, lassen sich möglicherweise erst nach Jahrzehnten nachweisen. Es ist daher grundsätzlich von Interesse, das System Deutsche Bucht noch tiefgreifender zu verstehen und zukünftige Entwicklung prognostizieren zu können.

Langfristige morphodynamisch-numerische Simulationen komplexer Naturräume sind selbst auf heutigen Hochleistungsrechnern rechenintensiv und langwierig. Dieses Teilprojekt hatte sich deshalb zum Ziel gesetzt, im Rahmen von AufMod (HEYER und SCHROTTKE 2013) ein Simulationssystem zu entwickeln, mit dem morphodynamische Simulationen über einen Zeitraum von 100 Jahren mit überschaubaren Computerressourcen möglich sind (PUTZAR und MALCHEREK 2012). Es sollte einerseits für Parameterstudien dienen, mit denen Aussagen zum Systemverhalten getroffen werden können. Andererseits und nicht weniger wichtig, sollte damit für eine Verbesserung der Prognosefähigkeit aufgezeigt werden, welche Erweiterungen in der morphodynamischen Modellierung notwendig sind.

Grundlage des Langfrist-Morphodynamikmodells - im Weiteren als Langfristmodell bezeichnet - bildet das TELEMAC-System (HERVOUET und BATES 2000). Die seit 2010 frei erhältliche Finite-Element-Software wurde erfolgreich in das in AufMod verfolgte Simulationskonzept integriert und zudem im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes angewendet. Die verwendeten Modelle des TELEMAC-Systems wurden den Erfordernissen für Langfristsimulationen durch umfangreiche Programmiererweiterungen angepasst. Als anthropogener Einfluss werden Unterhaltungsmaßnahmen mit dem Modell DredgeSim simuliert. Diese Modelle bilden zusammen mit den aufbereiteten Rand- und Anfangsbedingungen das Langfristmodell.

Auf die für das Langfristmodell verwendeten Modelle wird in den folgenden Abschnitten des Kap. 1 eingegangen. Ihre wesentlichen Funktionsweisen werden lediglich

skizziert, für detaillierte Beschreibungen wird auf die zitierte Literatur verwiesen. Weiterhin wird auf die Modellkopplung und die Anfangs- und Randbedingungen eingegangen. Anschließend wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem Langfristszenarien im Rahmen dieses Projekts modelliert wurden. Kap. 3 widmet sich der Validierung des Langfristmodells. Bei der Analyse von Volumenbilanzen wird am Beispiel des Jade-Weser-Ports der Einfluss von Baumaßnahmen skizziert. Anschließend werden in Kap. 4 eine Reihe von Szenarien zu natürlicher Morphodynamik der Deutschen Bucht über einen Zeitraum von 100 Jahren präsentiert. Im Gegensatz dazu wird in Kap. 5 gezeigt, welchen Einfluss Unterhaltungsmaßnahmen auf langfristige Sohländerungen haben können. Kap. 6 gibt einen Ausblick auf die zukünftige Langfristmodellierung.

## 1.1 Beschreibung der verwendeten numerischen Modelle

Zum Aufbau des prozessbasierten Langfristmodells wurden aus dem TELEMAC-System folgende Modelle ausgewählt:

- das 2D-Strömungsmodell TELEMAC-2D (HERVOUET 2007; EDF 2010b),
- das spektrale Seegangsmodell TOMAWAC (EDF 2011) und
- das morphodynamische Modell SISYPHE (EDF 2010a; VILLARET et al. 2013).

Die Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen erfolgte mit dem Modell DredgeSim (MAERKER und MALCHEREK 2010).

### 1.1.1 Hydrodynamikmodell

Das TELEMAC-2D-Modell löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen für Strömungen mit freier Wasseroberfläche. Die wesentlichen Ergebnisse an jedem Knoten des Rechengitters sind die Wassertiefe und die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten.

Für die Simulationen wurde das Elder-Turbulenzmodell gewählt und ein konstanter Coriolisparameter für das gesamte Modellgebiet vorgegeben. Besondere Beachtung wurde der Modellierung der Wattflächen gewidmet. Hierfür wurde das neu in TELEMAC-2D implementierte kantenbasierte Advektionsschema gewählt, welches besonders für Modellgebiete mit trockenfallenden Gitterknoten geeignet ist. Die Wattstrategie vermeidet negative Wassertiefen und ist gleichzeitig massenerhaltend. Die Sohlrauheit wird durch SISYPHE bereitgestellt und ist somit zeitlich und räumlich während einer Langfristsimulation variabel.

### 1.1.2 Seegangsmodell

Die Seegangsmodellierung wurde mit TOMAWAC durchgeführt. Es ist ein Seegangsmodell der dritten Generation und dient zur Simulation der Seegangsausbreitung in Küstengebieten auf Basis der Wave-Action-Gleichung. Wesentliche Ergebnisse sind die signifikante Wellenhöhe, die Peakfrequenz und die Wellenrichtung. Diese werden für morphodynamische Simulationen mit SISYPHE unter Seegangseinfluss benötigt.

Das Frequenz-Richtungs-Spektrum wurde mit 8 Frequenzen und 8 Richtungen diskretisiert. Die Simulationen für den Zeitraum 1996 bis 2006, die für die Generierung von Langfristszenarien verwendet wurden, sind ohne Gezeiteinfluss durchgeführt worden.

### 1.1.3 Morphodynamikmodell

Das morphodynamische Modell SISYPHE wurde zur Simulation von Sedimenttransport und der daraus resultierenden Sohlevolution verwendet.

Zur vertikalen Diskretisierung wurde das in SISYPHE implementierte Active-Layer-Konzept verwendet und der initiale Bodenaufbau durch 2 Schichten repräsentiert. Die oberste transportaktive Schicht, als Active-Layer bezeichnet, steht in direktem Kontakt mit dem angrenzenden Wasserkörper. Ihre Dicke wird als das Dreifache des mittleren Korndurchmessers definiert oder mindestens die noch vorhandene Sedimentschichtdicke. Darunter wurde eine Schicht vorgegeben, die sich bis an den nicht-erodierbaren Horizont anschließt. Beide Schichten zusammen bilden die Mächtigkeit der potentiell zum Transport verfügbaren Sedimentschicht.

Der Sedimenttransport, bestehend aus Schwebstoff- und Geschiebetransport, wird aus den von TELEMAC-2D bereitgestellten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten und den Wassertiefen berechnet. Diese Berechnungen werden in SISYPHE für jede Sedimentfraktion einzeln durchgeführt. Die Schwebstofffracht wird durch Lösen der tiefengemittelten Transportgleichung ermittelt. Im Fall von nicht-kohäsiven Sedimenten mit  $d > 64 \mu\text{m}$  wird außerdem die Geschiebefracht nach BIJKER (1971) berechnet. Sie bietet die Möglichkeit, sowohl die Tide- als auch die Seegangswirkung zu berücksichtigen.

Auf Grundlage des fraktionierten Sedimenttransportes wird wiederum die Sohlevolutionsgleichung für jede Sedimentfraktion einzeln gelöst und die Zusammensetzung der Sedimentbelegung aktualisiert. Die Summe der Sohlevolutionen jeder Fraktion ergibt letztendlich die gesamte Sohländerung an einem Berechnungsknoten nach einem Zeitschritt.

### 1.1.4 Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen

Anthropogene Effekte, insbesondere die Unterhaltungsmaßnahmen von Seeschiffahrtsstraßen, können einen entscheidenden Einfluss auf den Sedimenthaushalt nehmen. Mit dem Modul DredgeSim, entwickelt von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, in Kooperation mit dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München, können Bagger- und Verklappstrategien realitätsnah modelliert werden. In Verbindung mit TELEMAC-2D und SISYPHE bietet DredgeSim die Möglichkeit, Sedimentmanagement zu optimieren und effizienter zu planen.

In AufMod wurden für das Langfristmodell für die drei großen deutschen Ästuare Elbe, Weser und Ems Baggerkriterien definiert, die jeweils aktuelle Unterhaltungsstrategie enthalten. Im Wesentlichen wird eine Solltiefe entlang der Fahrrinne vorgegeben, die bei Überschreiten zur Entnahme von Sediment führt. Abb. 19 zeigt dies am Beispiel der Elbe.

In einem Intervall von einem Jahr werden die Baggerkriterien geprüft. Das entnommene Sediment kann wieder in fest definierte Gebiete verklappt oder gänzlich aus dem Simulationsmodell entnommen werden. Damit steht für morphodynamische Langfrist-

simulationen eine Vielzahl an Modellierungsmöglichkeiten von Unterhaltungsmaßnahmen zur Verfügung. Für eine genaue Beschreibung wird auf HEYER und SCHROTTKE (2013) verwiesen.

## 1.2 Modellkopplung

Das Langfristmodell wird durch TELEMAC-2D gesteuert, das mit SISYPHE direkt gekoppelt ist. Für die direkte Kopplung hat sich als Zeitschritt 200 s bewährt und wurde für alle in diesem Artikel beschriebenen Simulationsergebnisse verwendet.

Zu jedem Zeitschritt werden die von TELEMAC-2D berechneten Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten an SISYPHE übermittelt. Damit wird der Sedimenttransport als Geschiebe und als Schwebstoff berechnet. Anschließend wird die Exnergleichung für jede Sedimentfraktion gelöst. Das Ergebnis des morphodynamischen Schrittes ist die Sohlevolution an jedem Gitterknoten und die Fraktionierung des Sediments. Im Fall einer Simulation mit DredgeSim, welches intern mit SISYPHE gekoppelt ist, wird nachfolgend die Wirkung von Baggern und Verklappen simuliert. Am Ende eines Zeitschrittes werden die Sohlagen und die Sohlrauheiten von SISYPHE an TELEMAC-2D gesendet. Anschließend wird die Simulation mit aktualisierter Bathymetrie einen weiteren Zeitschritt fortgeführt oder bei Erreichen der Simulationsdauer beendet.

Für Simulationen mit Seegangseinfluss wurde ein entkoppelter Ansatz entwickelt. Der Seegang wurde a priori mit dem spektralen Seegangsmodell TOMAWAC gerechnet und die Seegangsparameter in Dateien abgelegt. Bei Simulationen mit Welleneinfluss können diese in Abhängigkeit vom gewählten Szenario vom Langfristmodell eingelesen werden. Daraus werden in SISYPHE die seegangsinduzierten Sohlschubspannungen für den aktuellen Zeitschritt bestimmt und für die Sedimenttransportberechnungen verwendet.

Zur Beschleunigung der Simulationen greift das Langfristmodell auf die MPI-Fähigkeiten der TELEMAC-Suite zurück (AUDOUIN et al. 2011). Für eine Modellzeit von 100 Jahren mit Tide-, Wind-, und Seegangsbelastung sowie Fernwellen beträgt die Simulationsdauer bei einem Zeitschritt von 200 s und mit 60 Prozessoren etwa 12 Tage. Morphodynamische Beschleunigungsverfahren werden nicht angewendet.

## 1.3 Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen

Das Gitternetz besteht aus ca. 80.000 Dreieckselementen und wurde im Rahmen von AufMod zur Verfügung gestellt. Das Modellgebiet umfasst somit die Nordsee, den Englischen Kanal und den westlichen Teil der Ostsee. Das Gitternetz wurde einheitlich für Simulationen mit TELEMAC-2D, TOMAWAC und SISYPHE verwendet.

Daneben wurde ein hochaufgelöstes Gitternetz entworfen (Feinmodell), das im Küstenbereich eine Auflösung von 100 m aufweist und dasselbe Gebiet wie das Basismodell umfasst. Dieses Feinmodell mit einer Elementanzahl von  $2 \times 10^6$  wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartnern zur Analyse von detaillierten Sedimenttransportprozessen verwendet.

Die Anfangs- und Randbedingungen entsprechen den im Gesamtprojekt verwendeten Daten. Abweichend von diesen Vorgaben wurde hier jeweils ein konstanter Oberwasserzufluss berücksichtigt für:

- die Elbe mit  $870 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- die Ems mit  $80,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- die Weser mit  $324,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- den Rhein mit  $2330 \text{ m}^3/\text{s}$  und
- die Themse mit  $65,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die initiale Bathymetrie wurde durch das Funktionale Bodenmodell (FBM, siehe MILBRADT et al. 2015) generiert und für verschiedene Jahre bereitgestellt. Abb. 1 zeigt die initiale Bathymetrie für das Jahr 2006 für das Grob- und Feinmodell. Die initiale Sedimentmächtigkeit wurde – wo vorhanden – auf Grundlage der holozänen Basis ermittelt oder als konstant mit 20 m im gesamten Modellgebiet angenommen.

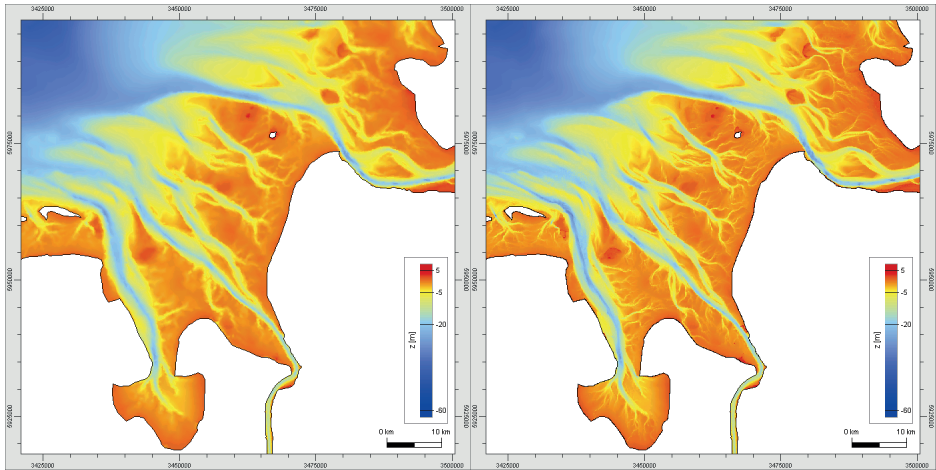


Abbildung 1: Initiale Bathymetrie von 2006 im Bereich der Elbe-Weser-Mündung: (links) Grobmodell mit 80.000 Elementen; (rechts) Feinmodell mit  $2 \times 10^6$  Elementen.

Die initiale Sedimentbelegung basiert auf den anisotropen Sedimentdaten des FBM. Die Zusammensetzung des Gewässerbodens wurde durch 8 Sedimentfraktionen diskretisiert:

- Very coarse sand mit  $d = 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Coarse sand mit  $d = 7 \times 10^{-4} \text{ m}$
- Medium sand mit  $d = 3.5 \times 10^{-4} \text{ m}$
- Fine sand mit  $d = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}$
- Very fine sand mit  $d = 8.8 \times 10^{-5} \text{ m}$
- Coarse silt mit  $d = 4.4 \times 10^{-5} \text{ m}$
- Fine silt mit  $d = 1.1 \times 10^{-5} \text{ m}$
- Clay mit  $d = 1.9 \times 10^{-6} \text{ m}$

Der daraus berechnete mittlere Korndurchmesser wird in Abb. 2 jeweils für das Grob- und das Feinmodell dargestellt. Der in das Modellgebiet eintretende Sedimentfluss wurde anhand von Gleichgewichtsbeziehungen vorgegeben.



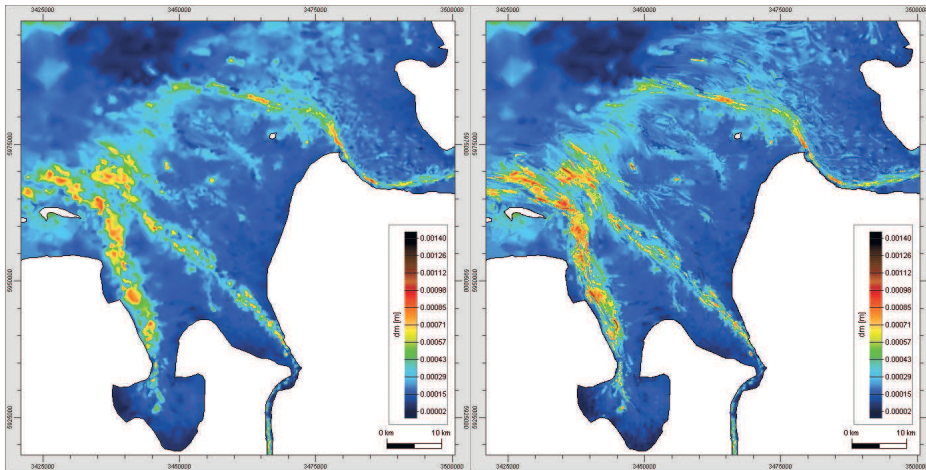


Abbildung 2: Mittlerer Korndurchmesser der initialen Sedimentbelegung im Bereich der Elbe-Weser-Mündung auf Basis anisotrop interpolierter Sedimentdaten: (links) Grobmodell mit 80.000 Elementen; (rechts) Feinmodell mit  $2 \times 10^6$  Elementen.

## 1.4 Modellierung von langfristigen Szenarien

Ein Aspekt dieses Teilprojekts war die Entwicklung von Szenarien für langfristige Simulationen. Das Langfristmodell wurde so konzipiert, dass Simulationen mit den Belastungen aus Gezeiten, Wind, Seegang, Fernwellen und Unterhaltungsmaßnahmen für Systemstudien separat oder in beliebiger Kombination durchgeführt werden können.

Während die periodische Wasserspiegelauslenkung der Gezeiten an den offenen Seerändern durch Partialtidensynthese in die Zukunft fortgeführt werden kann, musste für die anderen natürlichen Belastungen ein alternativer Weg gewählt werden, um realistische Szenarien zu entwickeln.

Grundlage bildeten die Windfelder der Jahre 1996 bis 2006 und die daraus mit **TOMAWAC** a priori berechneten Seegangsfelder sowie die einlaufenden Fernwellen an den offenen Seerändern. Aus diesem Datenpool wurden Teildatensätze für bestimmte Perioden, z. B. für das windarme Jahr 2006 oder das windreiche Jahr 1998, generiert. Die **TELEMAC**-Programme wurden für 100-jährige Simulationen so modifiziert, dass ein Teildatensatz synchron wiederholt wird. Im Falle einer Kopplung mit **DredgeSim** wurden die implementierten Unterhaltungsmaßnahmen auf den Simulationszeitraum ausgedehnt. Auf diese Weise konnten mit realistischen Belastungen aus dem Zeitraum 1996 bis 2006 langfristige Simulationen über einen Modellzeitraum von 100 Jahren für verschiedene Szenarien durchgeführt werden.

## 2 Validierung des Langfristmodells

Die Validierung des Langfristmodells wurde für einen Zeitraum von einem Jahr für die Hydrodynamik und den Seegang durchgeführt. Für die Sedimentdynamik wurde eine längere Periode gewählt. Auf Basis von Daten des FBMs wurde der Zeitraum 2006 bis 2012 zur Analyse herangezogen.

2.1 Hydrodynamik

Das Simulationsmodell wurde für das Jahr 2006 kalibriert und am Beispiel des Jahres 2001 validiert. Die Simulationen wurden mit Tide, Wind, Fernwellen und Oberwassereinfluss sowie mit fester Sohle durchgeführt.

Die Sohlrauheit wurde aus dem mittleren Korndurchmesser auf Basis der aus dem FBM generierten Sedimentbelegung und einem globalen Rauigkeitsparameter von 0,0125 m, der durch die Kalibrierung ermittelt wurde, berechnet. Um den Eintrittszeitpunkt der Tide zu optimieren, wurde die Sohllage außerhalb der Deutschen Bucht modifiziert. In diesem Gebiet wurde die Sohllage mit einem Faktor von 1,1 multipliziert.

Für einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen wurden 27 Datensätze von den im Projekt AufMod bereitgestellten Pegeldaten ausgewählt. Der Schwerpunkt wurde hierbei auf die Pegel der Deutschen Bucht gelegt. Bei der Ergebnisanalyse muss beachtet werden, dass für die Pegel Hooksielplate, Mellumplate und Wangerooge-Nord keine Daten für den Zeitraum 2001 vorlagen.

Die Ergebnisse der Partialtidenanalyse wurden mit dem Matlab-Paket 'T\_Tide' (PAWLOWICZ et al. 2002) bearbeitet und sind für die Amplitude der M2-Gezeit in Abb. 3 dargestellt. Für 2006 beträgt die mittlere absolute Abweichung (MAE) über alle Pegel 0,0412 m. Der geringste Fehler tritt am Pegel Bake A mit  $3,9 \times 10^{-4}$  m auf. Die größte Differenz liegt am Pegel Cromer mit 0,18 m vor.

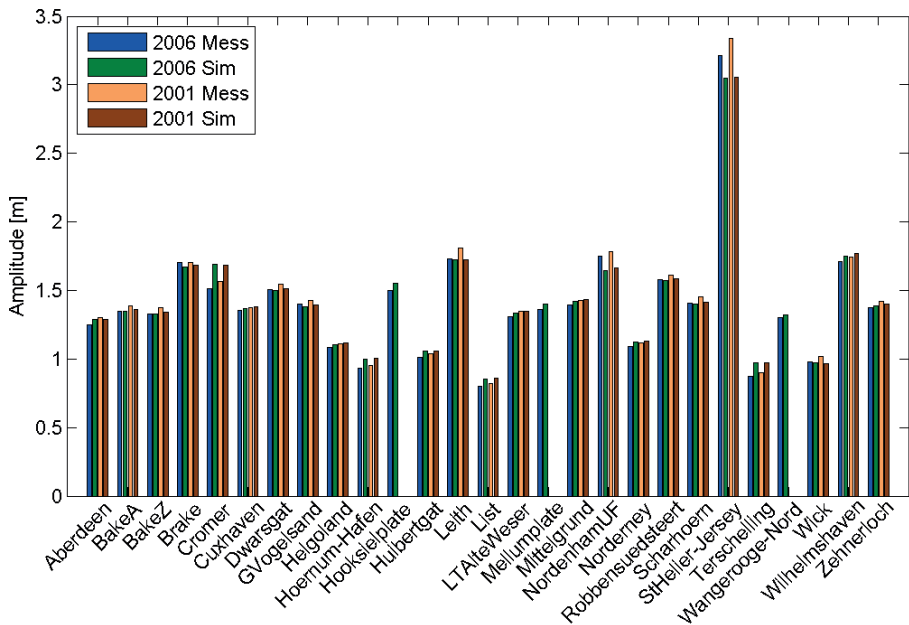


Abbildung 3: M2-Amplitude ausgewählter Pegel für die Nordsee und Vergleich mit TELEMAC-2D Simulation.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Simulationsjahr 2001. Der MAE der M2-Amplitude liegt in derselben Größenordnung und beträgt 0,0479 m. Ebenso ist die minimale Abweichung mit  $7,7 \times 10^{-4}$  m am Pegel Helgoland sehr gering. Der maximale Fehler tritt am

Pegel St. Heller-Jersey auf, ist aber mit 0,29 m größer als im Vergleich zum Simulationsjahr 2006.

Die statistischen Kennwerte zur Analyse der Wasserspiegellage sind in Tab. 1 zusammengefasst und als Mittelwerte über alle Pegel sowie als Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Abb. 4 zeigt stellvertretend den RMSE für die ausgewählten Pegel. Für das Jahr 2006 beträgt der RMSE 0,23 m mit einer Bandbreite von 0,17 m für den Pegel Huibergat bis 0,46 m, der am Pegel St. Heller-Jersey zu verzeichnen ist. Der MAE liegt naturgemäß darunter und beträgt als Mittelwert aller Pegel 0,18 m. Die simulierte Wasserspiegellage liegt im Mittel um 0,05 m über der gemessenen; die Korrelation ist nahezu 1.

Tabelle 1: Zusammenfassung statistischer Kennwerte der Wasserspiegellage für die Jahre 2006 und 2001.

Jahr	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	Min	max
2006	0.23	0.17	0.46	0.18	0.13	0.36	0.05	-0.17	0.17	0.983	0.969	0.989
2001	0.25	0.18	0.59	0.20	0.14	0.47	0.08	0.02	0.17	0.979	0.959	0.986

Der RMSE für das Jahr 2001 ist um 0,02 m geringfügig höher als 2001. Dagegen ist bei der größten Abweichung eine deutliche Zunahme auf 0,59 m zu verzeichnen. Auch der gemittelte MAE hat zugenommen und beträgt 0,20 m. Die Extremwerte unterscheiden sich aber nur wenig von denen des Jahres 2006. Dagegen liegt die simulierte Wasserspiegellage im Mittel systematisch über den Messungen und die Korrelation ist etwas geringer.

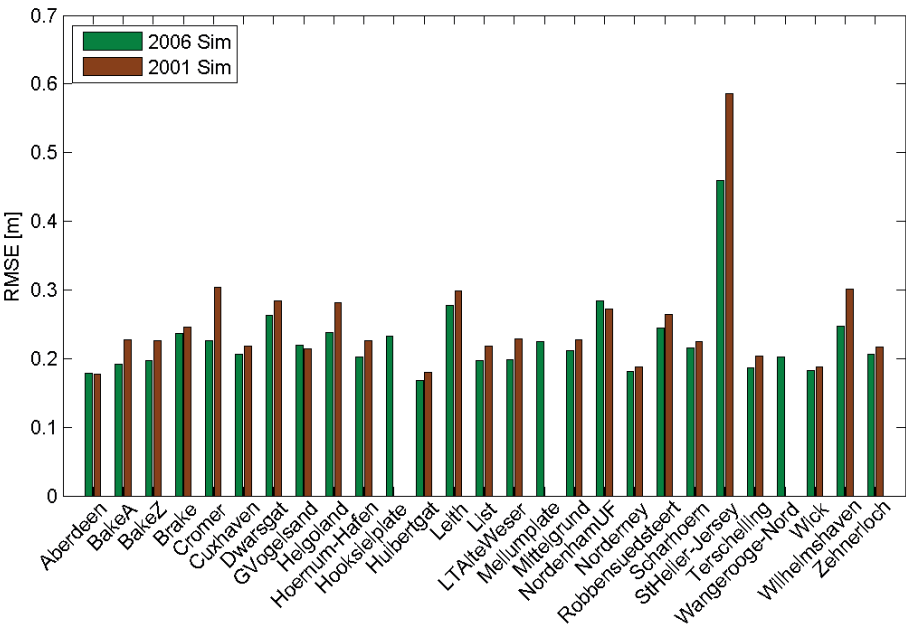


Abbildung 4: RMSE ausgewählter Pegel für die Nordsee für die Kalibrierung (2006) und die Validierung (2001).

## 2.2 Seegang

Für die Validierung des spektralen Seegangmodells TOMAWAC standen Daten der Pegel Elbe, FINO und Helgoland aus dem Jahr 2006 zur Verfügung. Sie wiesen allerdings teils beträchtliche Datenlücken auf.

In den Abb. 5 bis 7 sind die Messungen und Simulationsergebnisse dargestellt. Der Verlauf der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  wird bei allen 3 Pegeln gut wiedergegeben. Der RMSE ist maximal 0,38 m am Pegel FINO, ebenso der MAE mit 0,29 m (vgl. Tab. 2). Dieser Pegel weist allerdings die größten Datenlücken auf und ist damit weniger repräsentativ für das Jahr 2006 als die anderen beiden Pegel. Der Bias zeigt, dass die Wellenhöhe grundsätzlich unterschätzt wird, wobei aber die Korrelation nicht unter 0,89 fällt.

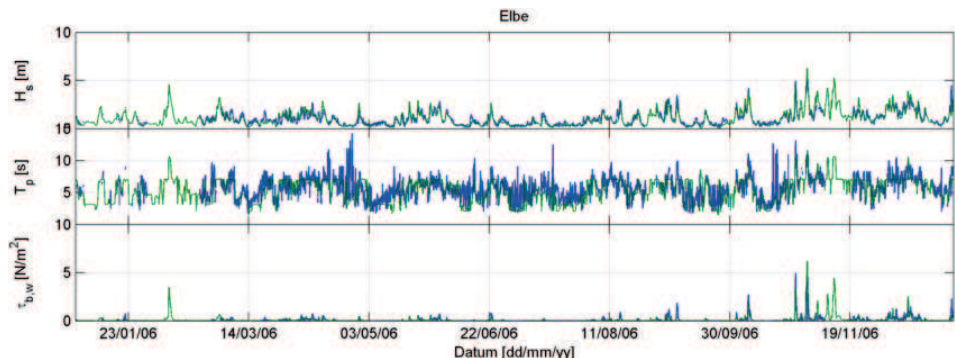


Abbildung 5: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  [m], Peakperiode  $T_p$  [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung  $\tau_{b,w}$  [N/m<sup>2</sup>] für den Pegel Elbe.

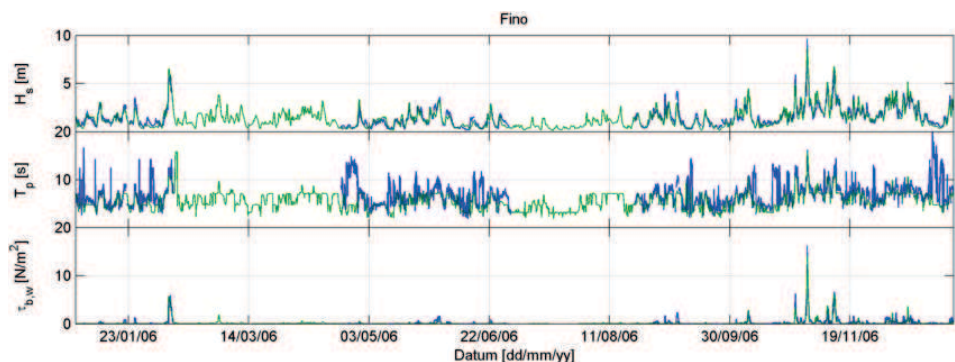


Abbildung 6: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  [m], Peakperiode  $T_p$  [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung  $\tau_{b,w}$  [N/m<sup>2</sup>] für den Pegel FINO.

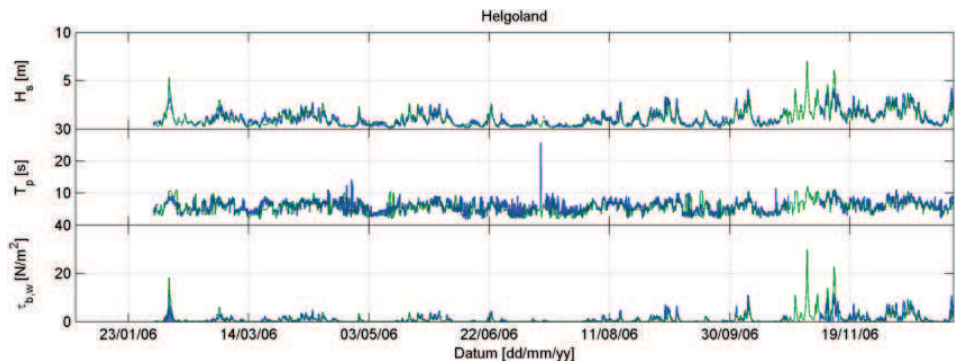


Abbildung 7: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanter Wellenhöhe  $H_s$  [m], Peakperiode  $T_p$  [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung  $\tau_{b,w}$  [N/m<sup>2</sup>] für den Pegel Helgoland.

Die Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Peakperiode fällt dagegen geringer aus. Der RMSE beträgt bis zu 2,65 s und die Wellenperiode wird deutlich unterschätzt. Das zeigt sich auch an der Korrelation. Sie fällt bis auf 0,39 am Pegel FINO und auf ca. 0,6 bei den anderen beiden Pegeln ab.

Tabelle 2: Statistische Kennwerte von Seegangparameter und der daraus berechneten Sohlschubspannung für das Jahr 2006 (Hel. = Helgoland).

Parameter	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.
$H_s$	0.32	0.38	0.35	0.21	0.29	0.24	-0.03	-0.05	-0.08	0.90	0.94	0.89
$T_p$	1.51	2.65	1.62	1.10	1.58	1.13	-0.34	-1.23	-0.45	0.63	0.39	0.61
$\tau_{b,w}$	0.18	0.31	0.97	0.06	0.13	0.44	-0.01	-0.06	-0.16	0.81	0.92	0.81

Für die morphodynamische Simulation ist besonders die durch Wellen erzeugte Sohlschubspannung von Bedeutung. Die Abb. 5 bis 7 zeigen diese für die drei Pegel zusammen mit den gemessenen Seegangsparemtern und mit den durch TOMAWAC berechneten Seegangsgößen. Obwohl die Peakperiode deutlich unterschätzt wird, kann die Sohlschubspannung gut simuliert werden. Das unterstützen auch die statistischen Kennwerte in Tab. 2. Auffällig sind allerdings die vergleichsweise hohen Werte für RMSE von 0,97 m und MAE von 0,44 m des Pegels Helgoland. Dies liegt an der größeren Bandbreite der Sohlschubspannung, die für diesen Pegel berechnet wurde. Da die Eingangsparameter bereits unterschätzt wurden, zeigt auch die simulierte Sohlschubspannung im Mittel diesen Trend.

2.3 Sedimentdynamik

Die Validierung des Langfristmodells wurde in Anlehnung des im Rahmen des Multimodell-Ansatzes angewendeten Konzeptes vorgenommen. Die Grundlage für die nachfolgenden Ergebnisse bilden somit auf das grobe Gitternetz volumentreu interpolierte Sohlagen. Die Daten wurden projektintern durch das FBM generiert und umfassen den Zeitraum 1996 bis 2012. Aufgrund ständiger Ergänzungen der Datenbank des FBMs können

nicht unerhebliche Abweichungen mit anderen Auswertungen im AufMod auftreten. Als Maske wurde im Hinblick auf die Analyse großräumiger und mittel- bis langfristiger Prozesse ein Gebiet bis zur 20 m-Tiefenlinie gewählt, das den küstennahen Bereich abdeckt sowie die Mündungsbereiche der Ästuarie Elbe, Ems und Weser umfasst (Abb. 13).

Für den Zeitraum von 2006 bis 2012 verzeichnet das FBM eine Volumenzunahme von  $82,3 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Tab. 3). Das sedimentierte Volumen beträgt  $1.148,8 \times 10^6 \text{ m}^3$  und erodiert werden demnach  $1.066,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Die mit dem Langfristmodell simulierten Volumina folgen diesem Trend, fallen aber geringer aus. In der Bilanz ergibt sich eine Volumenzunahme von  $21,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Das entspricht einem mittleren jährlichen Sedimenteintrag von ca. 9.3 Mio. t/a bei einer Sedimentdicke von  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Die simulierten Volumina betragen für die Deposition  $384,0 \times 10^6 \text{ m}^3$  und Erosion  $362,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Sie sind somit etwa ein Drittel so hoch wie die des FBMs.

Tabelle 3: Kennwerte zur Sedimentdynamik für den Zeitraum von 2006 bis 2012 (Grenzwert Sohländerung von 0,0 cm). Die in Klammern stehenden Werte wurden ohne den Bereich um den Jade-Weser-Port ermittelt.

Modell	Volumen in Mio. m <sup>3</sup>			Sohländerung		
	Σ	Deposition	Erosion	Ø	min	max
FBM	82,3	1.148,8	-1.066,5	0,0062	-24,3	14,2
	(72,9)	(1.118,1)	(-1.045,2)	(0,0055)	(-10,8)	(10,4)
Langfristmodell	21,1	384,0	-362,9	0,0016	-9,4	9,5
	(21,5)	(383,8)	(-362,3)	(0,0016)	(-9,4)	(9,5)

Die mittlere Sohländerung beträgt simuliert 0,0016 m und ist somit geringer als die des FBM mit 0,0062 m. Die Maximalwerte stimmen in der Größenordnung tendenziell überein, während eine weitaus größere Erosion aus den Daten des FBMs abgeleitet werden kann.

Eine Analyse dieser Diskrepanz zeigte, dass die Extremwerte der Sohlage im Bereich des Jade-Weser-Ports auftreten. Der Bau dieses Großprojekts ist deutlich in den Sohlagen des FBMs zu erkennen, im Simulationsmodell ist eine Modellierung jedoch nicht ohne weiteres möglich. Um trotzdem den Einfluss abschätzen zu können, wurde das Gebiet um den Jade-Weser-Port aus der Analyse ausgeschlossen. Tab. 3 stellt die Ergebnisse einander gegenüber. Hierbei soll aufgrund der Unsicherheiten des FBMs angemerkt werden, dass diese Werte als Richtwerte angesehen werden müssen. Aus ihr geht hervor, dass sich die Volumina und die Sohländerungen des FBMs deutlich ändern, während die Simulationsergebnisse nahezu gleich bleiben. Insbesondere beträgt die maximale Sohländerung nur noch etwa 10,4 m und die minimale Sohländerung ca. -10,8 m. Simulation und FBM stimmen somit wesentlich besser überein und zeigen, dass bauliche Maßnahmen die Validierung erheblich verfälschen können.

Interessant für eine Prädiktion sind nicht nur quantitative Aussagen zu den Sedimentvolumina, sondern auch ihr zeitlicher Verlauf. Dazu wurden für den Zeitraum 2006 bis 2012 jährliche Volumenanalysen durchgeführt und die Ergebnisse des FBMs und der Simulation verglichen. Die Volumina enthalten auch das Gebiet des Jade-Weser-Ports.

Abb. 8 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung. Die Verläufe sind im Prinzip ähnlich. Beim FBM könnte man annehmen, dass die Deposition ähnlich einer Wurzelfunktion verläuft und einem Grenzwert entgegenstrebt. Gleiches, nur an der x-Achse gespiegelt,

lässt sich für den Erosionsverlauf feststellen. Die Simulationsergebnisse zeigen im Zeitraum von 2006 bis 2012 nicht diese Tendenz, sondern verlaufen nahezu linear. Die Bilanz des FBMs ergibt ab 2009 eine Abnahme des Sedimentvolumens. Die Simulationsergebnisse prädikieren dagegen eine generelle gleichmäßige Zunahme auf Grundlage der errechneten Sedimentbilanzen.

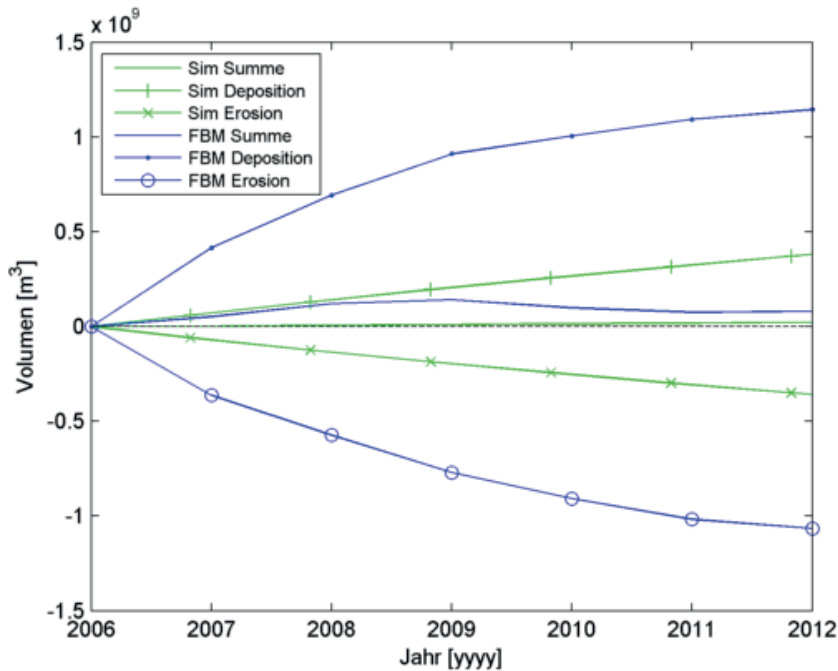


Abbildung 8: Vergleich der Sedimentvolumina des Langfristmodells (Sim) mit denen des Funktionalen Bodenmodells (FBM).

Da die Aussagekraft der Daten des FBMs von den zugrunde liegenden Datensätzen abhängt und sie mit räumlich und zeitlich veränderlichen Unsicherheiten behaftet sind, kann die Analyse nur einen Anhaltspunkt geben und die prinzipielle Vorgehensweise einer Validierung skizzieren. Es lässt sich aber festhalten, dass von 2006 bis 2012 eine Volumenzunahme vorliegt und diese auch vom Simulationsmodell wiedergegeben wird. Ebenso wird eine befriedigende Übereinstimmung zwischen großräumig erodiertem und deponiertem Sediment für den küstennahen Bereich erzielt.

Für zukünftige Untersuchungen sollte die quantitative Prognosefähigkeit des Langfristmodells, z. B. auf Grundlage von Parameterstudien, genauer abgeschätzt und ggf. verbessert werden. Anthropogene Einflüsse wie Baumaßnahmen oder auch Unterhaltungsmaßnahmen sind dabei zwingend zu berücksichtigen.

### 3 Szenarien zur ungestörten Sedimentdynamik

Um die Anwendbarkeit des Langfristmodells für Analysen der langfristigen und großräumigen Sedimenttransportprozesse zu demonstrieren, wurden folgende Szenarien untersucht:

- Meteorologie 2006: Belastung mit Wind und Seegang des Jahres 2006
- Meteorologie 1998: Belastung mit Wind und Seegang des Jahres 1998
- Meeresspiegelanstieg: tidegetriebene Simulationen ohne und mit einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm/100 a

Bei allen Simulationen wird die Tide eingesteuert und die Bathymetrie von 2006 verwendet. Unterhaltungsmaßnahmen werden nicht simuliert, so dass eine rein natürliche Morphodynamik gerechnet wird. Der Simulationszeitraum beträgt 100 Jahre.

#### 3.1 Szenario Meteorologie 2006

Das Szenario der Meteorologie 2006 wurde in AufMod im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes als Validierungszeitraum verwendet. Es ist ein relativ windarmes Jahr und bietet sich somit als Vergleich zu dem windreichen Jahr 1998 an. Entsprechend dem Konzept des Langfristmodells werden für die 100-jährigen Simulationen die Wind- und Seegangsfelder des Kalenderjahrs synchron bis zum Simulationsende wiederholt.

##### 3.1.1 Sohlentwicklung

Die Sohlentwicklung nach 100 Jahren Simulationszeit ist in Abb. 9 rechts dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangsbathymetrie (Abb. 9 links) lassen sich nur geringe großräumige Änderungen der Morphologie feststellen. Hervorzuheben ist das Gebiet südöstlich von Helgoland, in dem sich langfristig rinnenartige Vertiefungen gebildet haben.

Betrachtet man die Sohlevolution (Abb. 10 links), lassen sich Gebiete hoher Morphodynamik von denen geringer unterscheiden. Unterhalb der 20 m-Isobathe ist sie gering bis nicht vorhanden. Das führt im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals sogar zur Bildung einer ausgedehnten Depositionsfläche. Sie reicht von südlich Helgoland bis zum nordwestlichen Bereich der Deutschen Bucht, wobei die Breite fächerförmig zunimmt. In diesem Gebiet erreichen die Ablagerungen bis zu 0,5 m.

Morphodynamisch am aktivsten sind die küstennahen Bereiche mit den Seegaten und Rinnen sowie die Ästuare. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln sind Sohländerungen von -1,5 m bis 3 m insbesondere bei den Ebbedeltas zu verzeichnen, während auf den rückwärtigen Wattgebieten überwiegend Sediment deponiert wird.



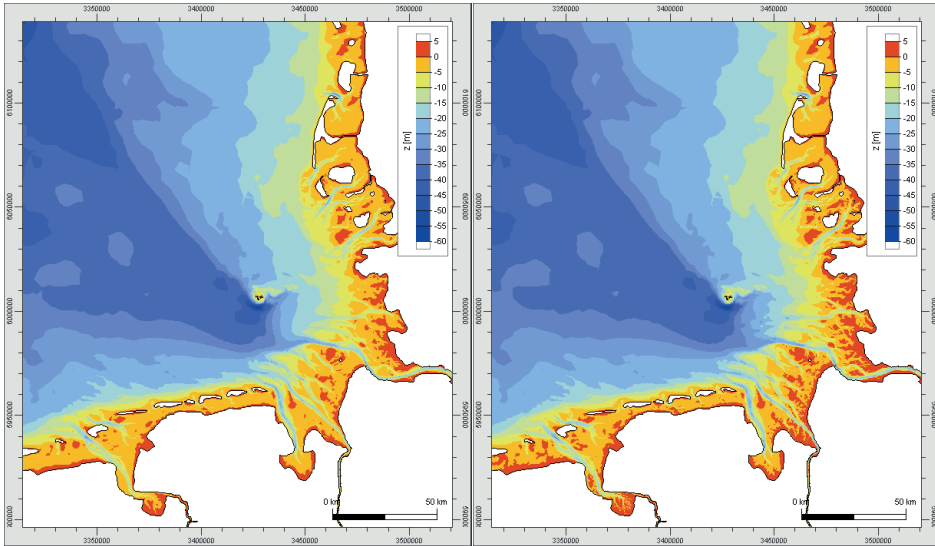


Abbildung 9: Szenario 2006: (links) initiale Sohlage; (rechts) Sohlage nach 100 Jahren.

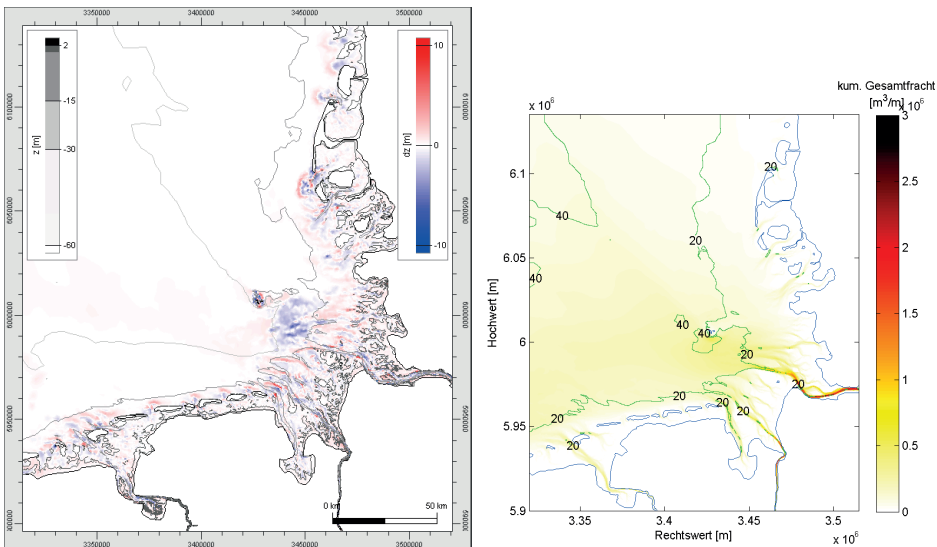


Abbildung 10: Szenario 2006: (links) simulierte Sohle nach 100 Jahren; (rechts) kumulierte Geschiebefracht nach 100 Jahren. Dargestellt sind auch die 40 m- und die 20 m-Isobathen bezogen auf NHN.

Eine hohe Dynamik zeigen das Elbe-Weser-Mündungsgebiet und die Dithmarscher Bucht (Abb. 10 links). Im Bereich der Außenjade lässt sich eine Sohlevolution (Rot) von 9,3 m bis -6,0 m bei gleichzeitiger Verlagerung in Richtung Osten verzeichnen. Ebenso lässt sich diese Tendenz auf die den Watten vorgelagerten und besonders dem Seegang

ausgesetzten Gebieten, z. B. Scharhörnriff und Nordergründe, beobachten. Die Sohländerungen sind geringer, liegen aber noch zwischen 3,6 m bis -2,5 m. Insgesamt findet eine Südwest-Nordost-Verlagerung des Sedimentvorkommens im Bereich der Elbe-Weser-Mündung statt. Auf den angrenzenden Wattgebieten wird Sediment mit einer Mächtigkeit von 0,05 m bis 0,4 m abgelagert, stellenweise auch bis 1 m. In der Dithmarscher Bucht sind es vor allem Norder- und Süderpiep, Tertiussand und Blauortsand, die morphodynamisch aktiv sind.

Weiter nördlich im Gebiet der Nordfriesischen Inseln sind die Sohländerungen weit aus geringer. Sie betragen durchschnittlich etwa 2 m und erreichen nur vereinzelt größere Werte, wie z. B. in der Norderhever (2,9 m) oder in der Süderau (8,6 m bis -3,9 m). Das ausgedehnteste Erosions- und Depositionsgebiet befindet sich südlich von Sylt. Hier finden großflächigere Sedimentumlagerungen statt, die zu Sohländerungen von 12,5 m bis -11,4 m führen. Hierzu sollten weitere numerische Analysen durchgeführt werden, um die Naturähnlichkeit dieser Maximalwerte abzusichern.

### 3.1.2 Kumulierter Sedimenttransport

Die örtlich sehr unterschiedliche Sedimentdynamik spiegelt Abb. 10 rechts wieder, in der die kumulierte absolute Sedimenttransportrate der Gesamtfracht dargestellt ist.

Großräumig betrachtet liegt ein signifikanter Transport im westlichen und südlichen Teil der Deutschen Bucht vor (ca. 1000 m<sup>2</sup>/s bis 2000 m<sup>2</sup>/s). Die Depositionszone im ehemaligen Elbe-Urstromtal lässt sich anhand des Musters wiedererkennen. Im Bereich der Nordfriesischen Inseln und dem vorgelagerten Küstenabschnitt sind die Beträge weitaus geringer; Werte von 1000 m<sup>2</sup>/s werden nicht überschritten.

Die höchsten Werte treten im Bereich der Rinnen und Ästuare auf. Hervorzuheben sind die Mündungsbereiche von Elbe (ca. 15 000 m<sup>2</sup>/s), Ems (ca. 4000 m<sup>2</sup>/s) und Weser (ca. 12 000 m<sup>2</sup>/s) sowie der Jade (ca. 3500 m<sup>2</sup>/s).

### 3.1.3 Residualer Sedimenttransport

Für die Analyse von ein- und ausgetragenen Sediment wurden residuale Ergebnisgrößen generiert und daraus Transportpfade beginnend auf einem gleichmäßigen Raster abgeleitet.

In Abb. 11 links ist zunächst die residuale Strömungsgeschwindigkeit des Wasserkörpers dargestellt. Man erkennt, dass die generelle Richtung der Trajektorien nach Norden führt. Von Westen kommend knicken die Pfade vor Helgoland ab. Die Pfade aus dem Inneren der Deutschen Bucht verlaufen zunächst in nordwestliche Richtung um dann Richtung Norden und Nordosten das Untersuchungsgebiet zu verlassen. Nördlich von Helgoland bildet sich nahezu ein Wirbel aus.

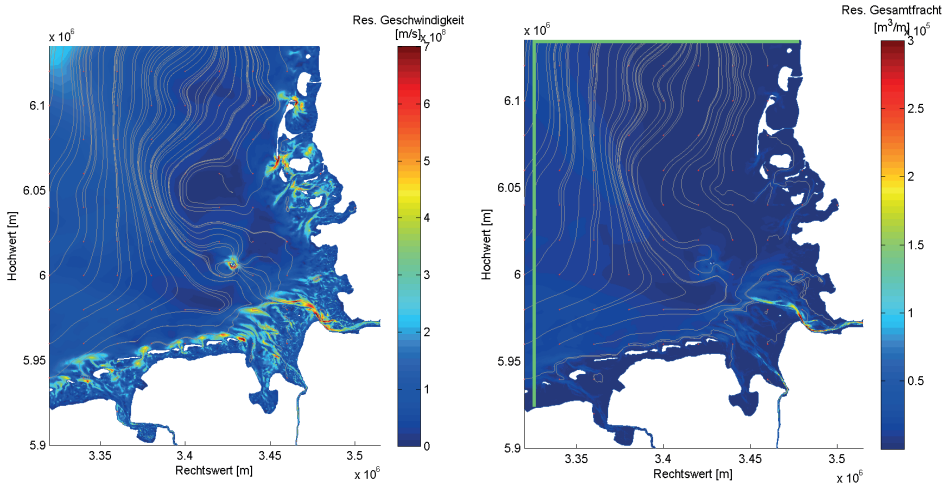


Abbildung 11: Szenario 2006: (links) residuale Strömungsgeschwindigkeit; (rechts) Gesamtfracht sowie Lage der Profile West und Nord (grüne Linien).

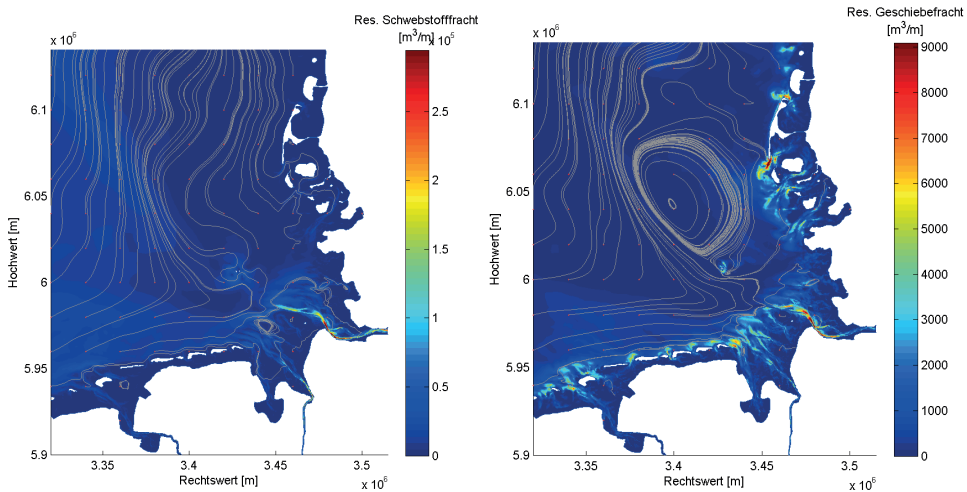


Abbildung 12: Szenario 2006: residueller Sedimenttransport aufgeschlüsselt nach Transportmodus; (links) Schwebstoff- und (rechts) Geschiebefracht.

Diesem Bild entspricht größtenteils auch die residuale Gesamtfracht (Abb. 11 rechts) als Summe aus Schwebstoff- und Geschiebefracht. Auch hier knicken die Trajektorien vor Helgoland nach Norden ab. Vor den Ostfriesischen Inseln existiert ein schmales residuales Transportband, über das Sediment bis in das Innere der Deutschen Bucht gelangt. Die Pfade hier lassen vermuten, dass Sediment nur umgelagert, aber nicht großräumig weiter transportiert wird. Ganz offensichtlich abgeschnitten von den in das Untersuchungsgebiet eintretenden Transportpfaden ist der Küstenbereich vor den Nordfriesischen Inseln. Bilanziert man die residualen Transporte nach 100 Jahren über die Ränder der Deutschen

Bucht, dann lässt sich zeigen, dass über den Westrand  $1.706,32 \times 10^6 \text{ m}^3$  Sediment eingetragen und über den Nordrand  $283,78 \times 10^6 \text{ m}^3$  ausgetragen werden (Tab. 4). Die Differenz von  $1.422,54 \times 10^6 \text{ m}^3$  verbleibt als Eintrag in das Untersuchungsgebiet.

Tabelle 4: Volumenbilanzen in Mio.  $\text{m}^3$  nach Transportmodus und Profil. Ein negatives Vorzeichen bedeutet Austrag aus der Deutschen Bucht.

Profil	Gesamtfracht	Transportmodus	
		Schwebstoff	Geschiebe
West	1.706,32	1.674,31	31,85
Nord	-283,78	-274,72	-8,68
gesamt	1.422,54	1.399,59	23,16

Abb. 12 links zeigt die residualen Pfade des Schwebstofftransportes. Die Größenordnung belegt, dass dieser Transportmodus den größten Anteil an der Gesamtfracht darstellt. Somit entsprechen auch die Transportpfade im Wesentlichen denen der Gesamtfracht.

Als Schwebstoff wird über den Westrand  $1.674,31 \times 10^6 \text{ m}^3$  ein- und über den Nordrand  $-274,72 \times 10^6 \text{ m}^3$  ausgetragen, so dass  $1.399,59 \times 10^6 \text{ m}^3$  im Untersuchungsgebiet verbleiben (Tab. 4). Auch beim Geschiebetransport (Abb. 12 rechts) knicken die von Westen kommenden Pfade vor Helgoland ab und verlassen das Untersuchungsgebiet nach Norden. Das Transportband vor den Ostfriesischen Inseln ist sehr viel schmaler, nur ein Bruchteil erreicht in der Bilanz den inneren Teil der Deutschen Bucht.

Im Gegensatz zum Schwebstofftransport weist der residuale Geschiebetransport ein wesentlich komplexeres Transportmuster aus. Nördlich von Helgoland existiert eine residuale Zirkulationszelle mit einem Durchmesser von etwa 50 km. Wie beim Schwebstofftransport ist die Sedimentbilanz positiv: über den Westrand dringen  $31,85 \times 10^6 \text{ m}^3$  ein, während über den Nordrand  $8,68 \times 10^6 \text{ m}^3$  das Gebiet verlassen und ein Gewinn von  $23,16 \times 10^6 \text{ m}^3$  zum Sedimenthaushalt in der Deutschen Bucht beiträgt.

### 3.2 Szenario Meteorologie 1996

Das Jahr 1998 weist im Gegensatz zum Jahr 2006 eine dreimal so große Anzahl an Tagen mit Windgeschwindigkeiten zwischen 12,5 m/s und 18,0 m/s auf (1998 über 60 Tage, 2006 nahezu 20 Tage). Daher wurde für eine Analyse des Wind- und Seegangseinflusses auf die Sedimentdynamik eine langfristige Simulation mit den Wind- und Seegangsfeldern von 1998 durchgeführt und die Ergebnisse mit denen des Szenarios 2006 verglichen.

#### 3.2.1 Sohlentwicklung

Grundsätzlich lassen sich zwischen beiden Szenarien keine prinzipiellen Unterschiede in den großräumigen morphologischen Strukturen nach 100 Jahren feststellen, weshalb auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird. Aussagekräftiger ist die Differenz zwischen beiden Sohlagen nach einem Zeitraum von 100 Jahren. Sie ist in Abb. 13 dargestellt. Hierbei wurde die Sohlage des Szenarios 2006 von der des Szenarios 1998 subtrahiert.

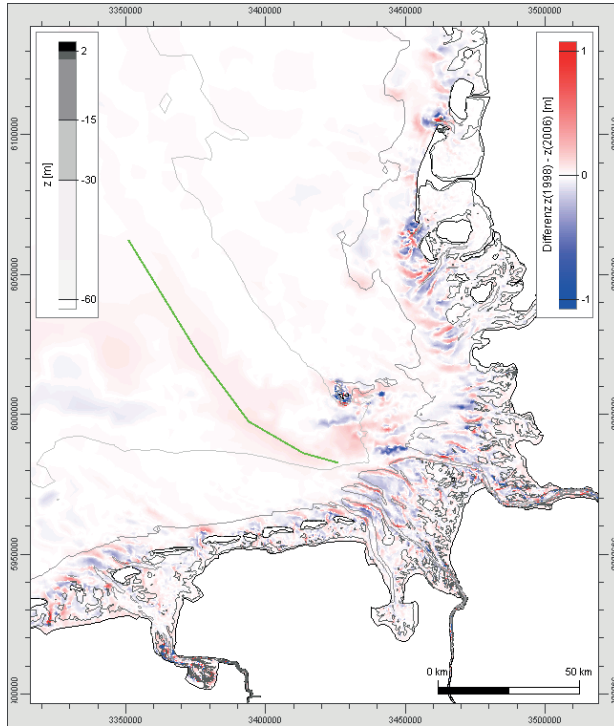


Abbildung 13: Szenario Meteorologie 1998: Sohldifferenz zwischen den Simulationen mit der Meteorologie von 1998 und von 2006.

Die Erosions- und Depositionstendenzen werden durch die Meteorologie 1998 verstärkt, was sich in einer erhöhten Sedimentumlagerung niederschlägt. Vor den Ostfriesischen Inseln liegen die Differenzen zwischen ca. 0,3 m und ca. -0,5 m, wie sie beispielsweise beim Norderneyer Seegatt ersichtlich sind. Im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung sind größere Unterschiede erkennbar, die von ca. -0,7 m bis ca. 0,7 m reichen. Als Beispiel seien die Gebiete der Außenjade und der Alten Weser genannt. Es lässt sich feststellen, dass vor den Ostfriesischen Inseln und im Gebiet der Weser-Elbe-Mündung vermehrt Sediment Richtung Osten verlagert wird.

Auch bei den Nordfriesischen Inseln führt die Simulation mit der Meteorologie von 1998 zu erhöhten Sedimentumlagerungen. Im Bereich der Ebbsdeltas sind die Differenzen in einer Größenordnung, wie sie im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung auftreten. Besonders ausgeprägt sind sie südlich von Sylt; hier sind es die Theeknobsände, die Maximalwerte zwischen ca. -1 m und ca. 1 m aufweisen.

Zwar sind die Sohllagen beider Szenarien relativ ähnlich, jedoch lässt sich im Bereich des Elbe\_Urstromtals eine deutliche ausgedehnte Sohldifferenz nach 100 Jahren feststellen. Sie ist in Abb. 14 entlang eines Polygonzugs, beginnend nördlich vor Wangerooge auf Höhe der 30 m-Isobathe (Abb. 13), dargestellt. Demnach führt die Meteorologie von 1998 zunächst zu einer exponentiellen Zunahme bis zum Maximalwert von 0,1 m bei km 10,87. Anschließend nimmt die Sohldifferenz linear ab. Die Sohllage liegt somit ausnahmslos höher als beim Szenario 2006.

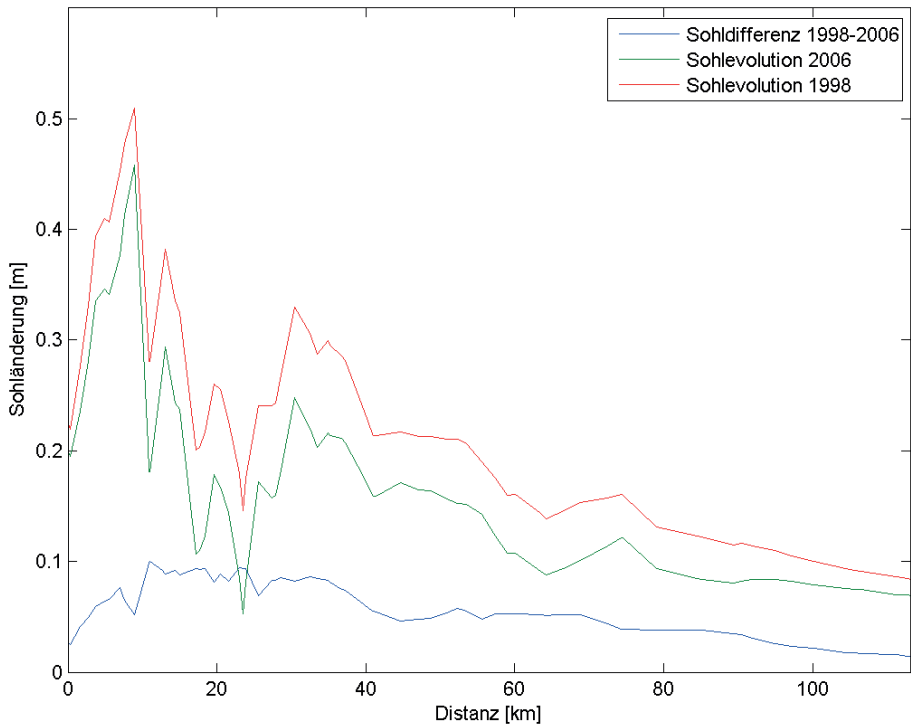


Abbildung 14: Szenario Meteorologie 1998: Sohlenentwicklungen nach 100 Jahren entlang des Profils in Abb. 13 mit der Meteorologie von 1998 und 2006 sowie ihrer Differenz. Das Profil verläuft von der Küste ( $x = 0$  km) bis in den tiefen Bereich der Deutschen Bucht ( $x = 113$  km).

Zusätzlich sind in Abb. 14 die Sohlevolutionen beider Szenarien abgebildet. Beide Profile sind wie erwartet ähnlich und zeigen nach einem Anstieg auf den Maximalwert eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Distanz, die nur bei km 20 durch eine geringere Sohlevolution gestört wird. Es handelt sich demnach in beiden Szenarien um ein Depositionsgebiet.

### 3.2.2 Residualer Sedimenttransport

Die residualen Transporttrajektorien beider Szenarien unterscheiden sich vor allem im Westteil des in Abb. 15 dargestellten Gebiets. Durch erhöhte Wind- und Seegangswirkung verschieben sich die Transportpfade des Szenarios 1998 Richtung Osten. Bei beiden Szenarien kann ein Abknicken vor Helgoland und die anschließende Bündelung entlang des Elbe-Urstromtals festgestellt werden. Weiterhin ist ebenfalls beim Szenario 1998 erkennbar, dass vor den Ostfriesischen Inseln ein residuales Transportband Richtung Osten existiert und vor den Nordfriesischen Inseln die Transportpfade das Gebiet nördlich verlassen.

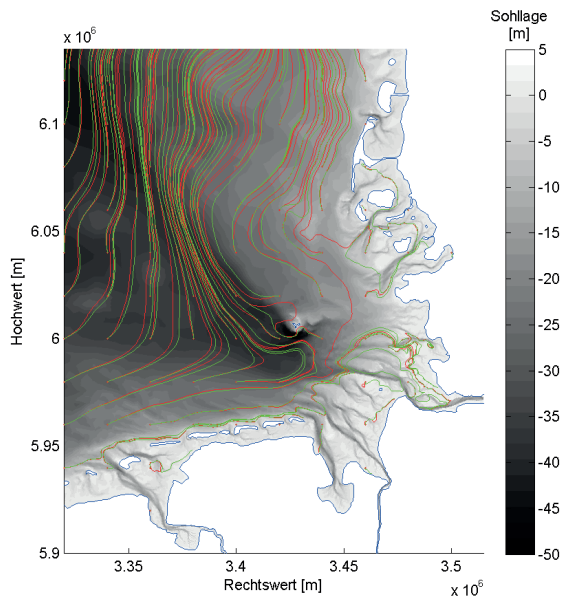


Abbildung 15: Szenario Meteorologie 1998: Vektoren der residualen Gesamtfracht mit Meteorologie 2006 (rot) und mit Meteorologie 1998 (grün).

3.2.3 Änderung der Volumenbilanzen

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass das Szenario 1998 eine höhere Sedimentdynamik aufweist. Das ist ebenfalls aus den Volumenbilanzen für das Gebiet der Deutschen Bucht ersichtlich. In Tab. 5 sind die Volumendifferenzen zwischen Szenario 1998 und 2006 zusammengefasst.

Tabelle 5: Änderungen der Volumenbilanzen in Mio. m<sup>3</sup> und Prozentanteil je nach Transportmodus und Profil. Berechnet wurden die Differenzen zwischen Szenario 1998 und Szenario 2006.

Profil	Gesamtfracht	Transportmodus	
		Schwebstoff	Geschiebe
West	345,18 (20,23 %)	326,79 (19,52 %)	18,20 (57,14 %)
Nord	-13,25 (4,67 %)	-12,01 (4,37 %)	-1,22 (14,02 %)
gesamt	331,93 (23,33 %)	314,78 (22,49 %)	16,98 (73,30 %)

Demnach erhöht sich die über das Westprofil eintretende Gesamtfracht um  $345,18 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, was einer prozentualen Zunahme um 20,23 % entspricht. Das aus der Deutschen Bucht über das Nordprofil transportierte Sediment nimmt ebenfalls zu. Über dieses Profil verlassen das Untersuchungsgebiet  $13,25 \times 10^6$  m<sup>3</sup> mehr als beim Szenario 2006. Die prozentuale Zunahme ist wesentlich geringer als über das Westprofil und beträgt 4,67 %. In der Bilanz verbleiben somit  $331,93 \times 10^6$  m<sup>3</sup> und führen zu einer Zunahme des Sediments in der Deutschen Bucht um 23,33 %.

Der Schwebstofftransport nimmt über das westlich gelegene Profil um 19,52 % zu. Der Sedimenteintrag in Höhe von  $326,79 \times 10^6 \text{ m}^3$  macht auch im Szenario 1998 deutlich, dass dieser Transportmodus maßgeblich zum Sedimenthaushalt beiträgt. Somit ist auch der Austrag über das Nordprofil mit  $12,01 \times 10^6 \text{ m}^3$  bzw. 4,37 % in der Größenordnung wie bei der Gesamtfracht. Das als Schwebstoff eingetragene und verbleibende Sediment nimmt somit um  $314,78 \times 10^6 \text{ m}^3$  zu.

Deutlich höhere prozentuale Werte werden für den Geschiebetransport berechnet. Die Meteorologie von 1998 führt zu einer Zunahme über das Westprofil von 57,14 %, was einem Volumen von  $18,20 \times 10^6 \text{ m}^3$  entspricht. Über das Nordprofil wird 14,02 % mehr Sediment als Geschiebe ausgetragen. In der Summe verbleiben in der Deutschen Bucht  $16,98 \times 10^6 \text{ m}^3$  mehr Sediment als beim Szenario 2006.

### 3.3 Szenario Meeresspiegelanstieg

Zur Bewertung des Meeresspiegelanstiegs (MSA) auf den Sedimenthaushalt der Deutschen Bucht wurden zwei tidegetriebene Simulationen miteinander verglichen. Eine Simulation wurde ohne Meeresspiegelanstieg durchgeführt. Bei dem anderen Szenario wurde an den offenen Seerändern ein linearer Meeresspiegelanstieg von 80 cm/100a eingestellt und dadurch die Wasserspiegellage in jedem Simulationszeitschritt um einen konstanten Wert erhöht.

#### 3.3.1 Sohlerwicklung

Die Sohlage der Simulation mit Meeresspiegelanstieg (MSA) ist in Abb. 16 links dargestellt. Es lassen sich durch Tide und Meeresspiegelanstieg keine signifikanten großräumigen

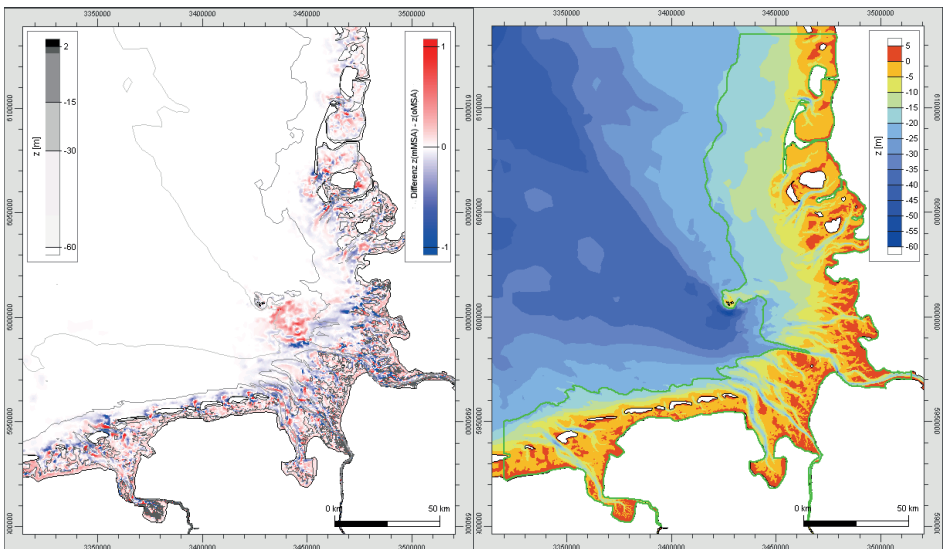


Abbildung 16: Szenario Meeresspiegelanstieg (MSA): (links) Sohlage nach 100 Jahren mit MSA und die für die Volumenbilanzen verwendete Maske (grünes Polygon); (rechts) Differenz der Sohlage zwischen der Simulation mit und ohne MSA.



Änderungen der morphologischen Struktur verzeichnen. Allerdings rücken diese durch den MSA näher an die Küstenlinie heran. Die Differenz zwischen der Simulation mit MSA und ohne MSA zeigt Abb. 16 rechts. Die Differenzen treten in den Wattgebieten und im Küstennahfeld auf und überschreiten kaum einen Wert von 1 m.

### 3.3.2 Residualer Sedimenttransport

Die residuellen Sedimenttransportpfade der Gesamtfracht beider Simulationen sind im Westteil der Deutschen Bucht identisch (Abb. 17). Im inneren Bereich lassen sich vereinzelt Unterschiede feststellen. Im Nordostteil sind die Transportpfade mit MSA nach Osten verschoben.

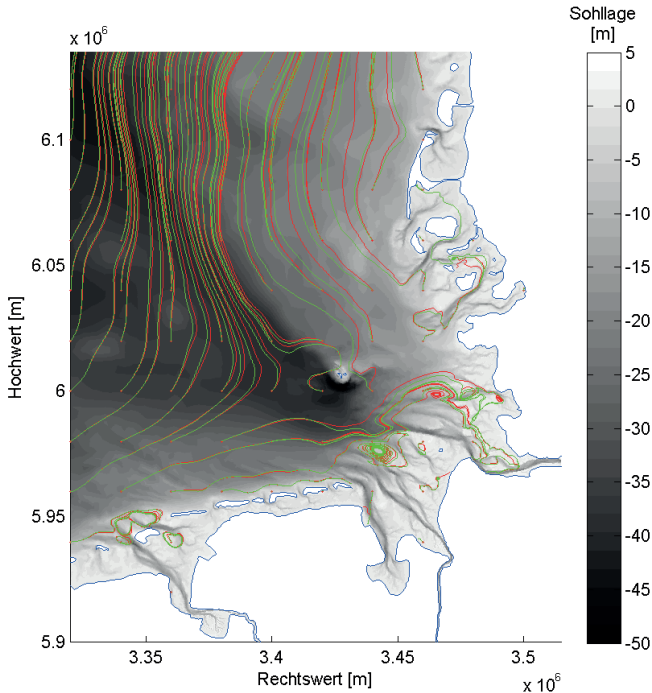


Abbildung 17: Szenario Meeresspiegelanstieg: Vektoren der residualen Gesamtfracht: grün ohne MSA; rot mit MSA.

### 3.3.3 Langfristige Volumenbilanzen

Die Auswirkung des MSA auf den Sedimenthaushalt zeigt Abb. 18. Der Funktionsverlauf ist bei beiden Simulationen wie erwartet ähnlich, aber die Kurve mit MSA verläuft flacher. Nach 100 Jahren Simulationszeit werden so ohne Meeresspiegelanstieg  $3,7 \times 10^8 \text{ m}^3$  und mit MSA  $3,3 \times 10^8 \text{ m}^3$  abgelagert. Ein säkularer Meeresspiegelanstieg von 80 cm führt also zu einer Reduktion des abgelagerten Sedimentvolumens um 11 %.

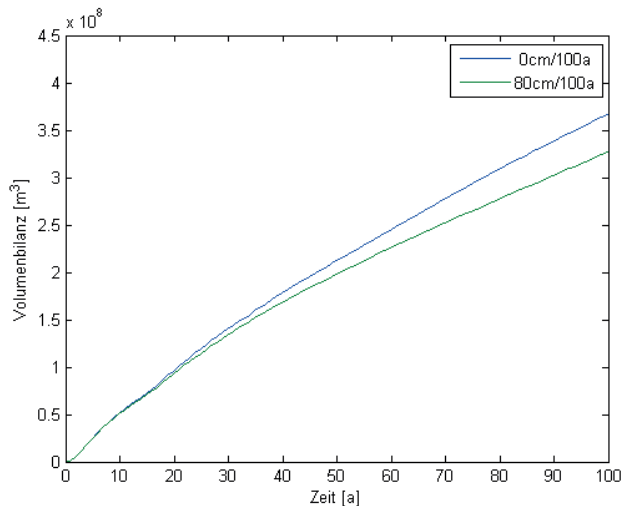


Abbildung 18: Szenario Meeresspiegelanstieg: Volumenbilanzen für den küstennahen residualen Sedimenttransport.

4 Einfluss von Unterhaltungsmaßnahmen auf den Sedimenthaushalt

Um die Wirkung von Baggerstrategien isoliert zu betrachten, wurde eine Simulation mit einem Korndurchmesser von 0,375 mm durchgeführt und als Belastung nur die Tide eingesteuert. In einer weiteren Simulation wurden Unterhaltungsmaßnahmen in der Tideelbe berücksichtigt. Auf eine Verklappung des entnommenen Sediments wurde verzichtet. Als initiale Sohllage wurde wie bei den anderen Langfristsimulationen die von 2006 verwendet. Einen Eindruck der in DredgeSim modellierten Solltiefe gibt Abb. 19.

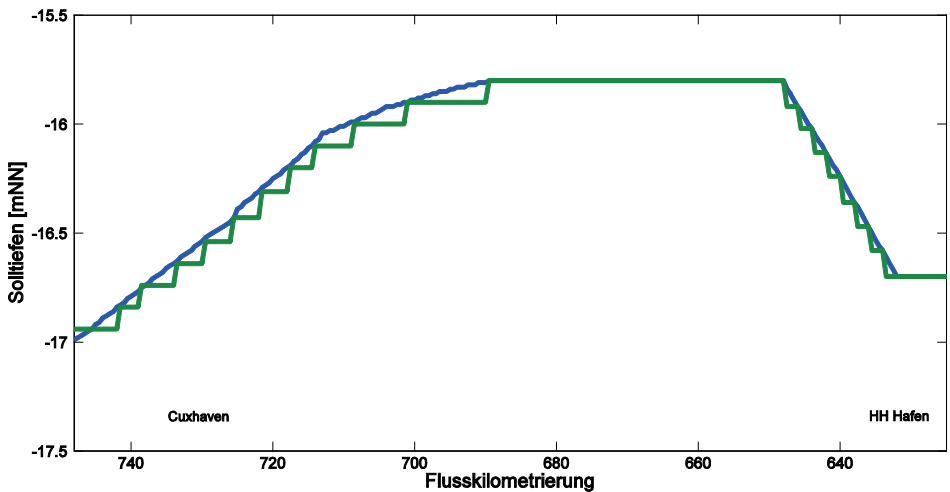


Abbildung 19: Modellierter Solltiefe der Tideelbe mit abschnittsweise konstanten Verlauf für DredgeSim (grün) und tatsächliche, im Rahmen des Projektes bereitgestellte Solltiefe (blau).

## 4.1 Sohlentwicklung im Mündungsbereich der Elbe

Besonders deutlich lässt sich der Einfluss der Unterhaltungsmaßnahmen auf die simulierte Morphodynamik am Mündungsbereich der Elbe skizzieren. Ohne Unterhaltungsmaßnahmen verlagert sich das Fahrwasser der Außenelbe zwischen dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand in Richtung Nordosten, wie Abb. 20 links zeigt. Zur Orientierung sind die Baggergebiete als gelbe Polygone dargestellt. Werden aber die Baggermaßnahmen berücksichtigt (Abb. 20 rechts), sind die Erosionen und Depositionen in der Fahrrinne geringer und die im Modell simulierte natürliche Tendenz der Fahrwasserverlagerung nach Nordosten wird vermindert.

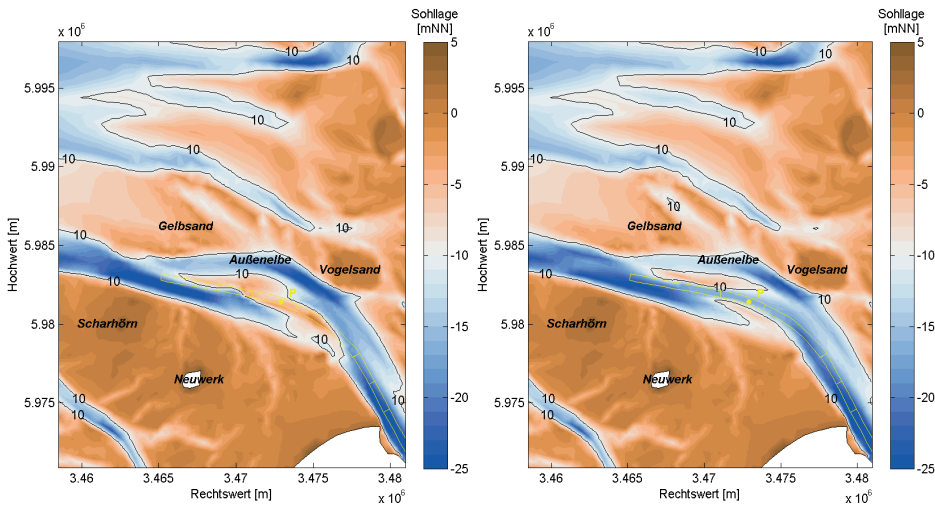


Abbildung 20: Sohlage nach einem Simulationszeitraum von 100 Jahren: (links) ohne Baggern; (rechts) mit Baggern. Die Baggergebiete sind als gelbe Polygone gekennzeichnet sowie der Punkt P für die Zeitreihenanalyse.

## 4.2 Längsprofil der Fahrrinne

Das Längsprofil der Sohlage entlang der Baggerpolygone (Abb. 21, Zunahme der Distanz in Flutrichtung) zeigt, dass die Fahrrinne ohne Unterhaltungsmaßnahmen über ca. 14 km signifikant verfüllt wird und die Schiffbarkeit nicht mehr gewährleistet ist. Wird Sediment entnommen, dann wird die Sohlage entsprechend der Solltiefe korrigiert und die morphodynamische Entwicklung massiv beeinflusst. Die daraus resultierenden Sohlendifferenzen zwischen beiden Simulationen betragen bis zu 17 m.

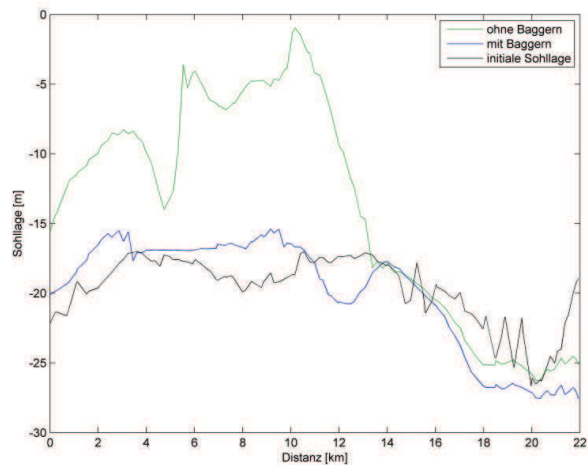


Abbildung 21: Profil der Sohlage entlang der Baggerpolygone (Zunahme Distanz in Flutrichtung).

### 4.3 Zeitreihen der Sohlentwicklung

Die Sohlenentwicklung für beide Szenarien ist in Abb. 22 für den Punkt P (Position siehe Abb. 20) dargestellt. Ohne Baggern ist nahezu ein kontinuierlicher Anstieg der Sohlenlage um 15 m zu verzeichnen. Nach etwa 80 Jahren ist ein Rückgang um ca. 1 m in den verbleibenden 20 Jahren ersichtlich. Mit der Entnahme von Sediment steigt die Sohlenlage zwar zunächst auch kontinuierlich über einen Zeitraum von 19 Jahren an, wird jedoch bei Erreichen der Solltiefe durch die Baggerstrategie begrenzt.

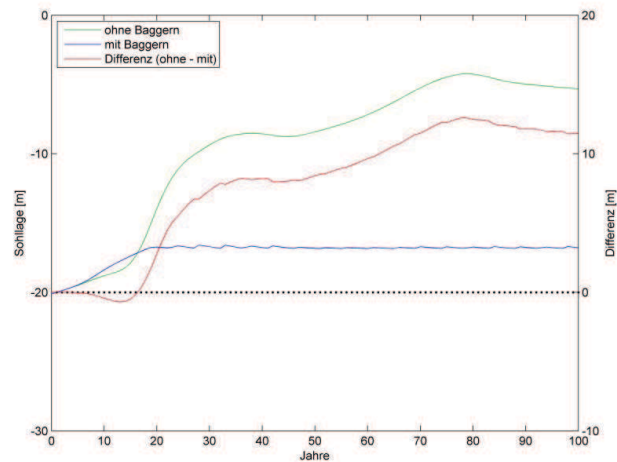


Abbildung 22: Sohlenentwicklung mit/ohne Baggerungen für den Punkt P.

Interessant ist zudem, dass in den ersten fünf Jahren die Sohlenentwicklung an der ausgewerteten Position bei beiden Szenarien nahezu identisch ist, wie die Sohlenlagendifferenz zwischen der Simulation ohne und mit Baggern zeigt. Das lässt vermuten, dass erst durch mittel- bis längerfristige Simulationszeiträume signifikante Auswirkungen analysiert werden können.

## 5 Ausblick

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass langfristige Simulationen mit einem direkt gekoppelten Modell ohne morphodynamische Beschleunigungsverfahren in einem überschaubaren Zeitrahmen möglich sind. Sie leisten einen wertvollen Beitrag zum Systemverständnis eines komplexen Systems wie das der Deutschen Bucht.

Das Langfristmodell bietet eine gute Ausgangsbasis für eine weitergehende Analyse der Sedimentdynamik. Beispielsweise können langfristige Simulationen mit einem dreidimensionalen Strömungsmodell oder mit einer höheren Gitternetzauflösung wie z. B. dem Feinmodell durchgeführt werden. Ein anderer Ansatz ist die SubGrid-Modellierung der morphodynamischen Prozesse auf einem groben Gitternetz, um bei geringen Computerressourcen die Simulationsergebnisse zu verbessern. Weiterhin sollte der Einfluss kohäsiver Sedimente auf die Morphodynamik durch geeignete Modellierungsansätze besser berücksichtigt werden. Ein weiterer Aspekt sind anthropogene Einflüsse, deren Wirkung am Beispiel von Unterhaltungsmaßnahmen gezeigt wurde. Diese zu erfassen und zu modellieren ist für eine Verbesserung der Prognosefähigkeit sicherlich von hoher Bedeutung. Nicht zuletzt sind biologische und chemische Prozesse Faktoren, die in zukünftigen Langfristmodellen Beachtung finden sollten.

## 6 Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Teilprojektes AufMod-D/TP 4 generiert, ein Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (03KIS085), finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Weiterhin gilt der Dank der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe für die Unterstützung bei der Simulation mit dem TELEMAC-System auf ihren Hochleistungsrechnern.

## 7 Schriftenverzeichnis

- AUDOUIN, Y.; MOULINEC, C.; BARBER, R. W.; SUNDERLAND, A. G.; GU, X.-J. and EMERSON, D. R.: Preparing TELEMAC-2D for extremely large simulations. In: VIOLEAU, D.; HERVOUET, J.-M.; RAZAFINDRAKOTO, E. and DENIS, C. (eds.): XVIIIth TELEMAC-MASCARET Users Conference, 2011.
- BIJKER, E. W.: Longshore transport computations. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, ASCE, No WW4, 687-701, 1971.
- EDF: SISYPHE-2D User Manual Version 6.0. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2010a.

- EDF: TELEMAC-2D User Manual Version 6.0. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2010b.
- EDF: TOMAWAC User Manual Version 6.1. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2011.
- HERVOUET, J. M. and BATES, P. (eds.): The TELEMAC Modelling System. Hydrological Processes, Special Issue, Vol. 14, 2000.
- HERVOUET, J.-M.: Hydrodynamics of free surface flows: modeling with the finite element method. John Wiley & Sons, 2007.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod, Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten, doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.  
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>
- MAERKER, C. und MALCHEREK, A.: Die Analyse von Baggern und Verklappen. Teil 1: Das Softwarepaket DredgeSim, Korrespondenz Wasserwirtschaft, 3 (10), 550-555, 2010.
- MILBRADT, P.; KÖSTERS, F.; PUTZAR, B. und PLÜß, A.: Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes, Die Küste, 83, 2015.
- PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B. and LENTZ, S.: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t\_tide. Computers and Geosciences, 28, 929-937, 2002.
- PUTZAR, B. and MALCHEREK, A.: Development of a Long Term Morphodynamic Model of the German Bight. In: BOURBAN, S.; DURAND, N. and HERVOUET, J.-M. (eds.): XIXth TELEMAC-MASCARET Users Conference, 2012.
- VILLARET, C.; HERVOUET, J.-M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U. and DAVIES, A. G.: Morphodynamic modeling using the TELEMAC finite-element system. Computers & Geosciences, 53, 105-113, 2013.